北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

毛竹径向梯度结构对吸湿的影响Ⅱ：吸湿湿胀行为

万晨琪 周梦佳 马尔妮

Influence of radial gradient structure on moisture absorption of *Phyllostachys edulis* : moisture absorption-swelling behavior

Wan Chenqi, Zhou Mengjia, Ma Erni

引用本文:
万晨琪, 周梦佳, 马尔妮. 毛竹径向梯度结构对吸湿的影响Ⅱ：吸湿湿胀行为[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11):167-174. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250204
Wan Chenqi, Zhou Mengjia, Ma Erni. Influence of radial gradient structure on moisture absorption of *Phyllostachys edulis* Ⅱ: moisture absorption-swelling behavior[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11):167-174. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250204

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250204

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氯化锌浸渍处理对樟子松热处理材尺寸稳定性和处理能耗的影响

Effects of zinc chloride impregnation treatment on dimensional stability and energy consumption of heat-treated Mongolian scots pine

北京林业大学学报, 2024, 46(2): 123-131. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230244

毛竹材径向篾抗拉和抗弯性能研究

Tensile and bending properties of radial slivers of Moso bamboo

北京林业大学学报, 2022, 44(3): 140-147. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210333

碱木质素与超支化聚丙烯酸酯乳液复配改性速生青杨的尺寸稳定性研究

Dimensional stability of fast-growing *Populus cathayana* modified with the compound of alkali lignin and hyperbranched polyacrylate emulsion

北京林业大学学报, 2021, 43(11): 118-127. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210268

毛竹不同构造中细胞化学成分及热稳定性研究

Chemical composition and thermal stability of cells in different structures of *Phyllostachys edulis*

北京林业大学学报, 2023, 45(8): 156-162. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230104

原位聚合酯化改性欧洲赤松的尺寸稳定性

Dimensional stability of Scots pine modified by in-situ polymerization esterification

北京林业大学学报, 2022, 44(3): 129-139. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210271

竹材非对称性弯曲行为对弯曲构件性能的影响

Influence of asymmetric bending behavior of bamboo on performance of curved components

北京林业大学学报, 2025, 47(4): 168-176. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240360

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250204

毛竹径向梯度结构对吸湿的影响Ⅱ:吸湿−湿胀行为

万晨琪 周梦佳 马尔妮
(北京林业大学材料科学与技术学院,木材科学与工程北京市重点实验室,北京 100083)

摘要:【目的】竹材的吸湿性及其引发的湿胀变形是限制其高附加值利用的关键,然而基于径向梯度结构的吸湿−湿胀机制尚未被阐明。为此,本研究以毛竹为对象,比较不同相对湿度(RH)条件下竹青侧至竹黄侧在吸湿平衡态和吸湿过程中的水分−变形响应行为,旨在揭示竹壁径向梯度结构对吸湿−湿胀行为的影响。**【方法】**将毛竹沿竹壁径向划分为竹青侧、竹中部与竹黄侧 3 个部分,基于纤维体积分数量化梯度结构。在 11%、33%、57%、84% 和 97% 这 5 个相对湿度下,测定各部位在吸湿过程和平衡态的含水率与尺寸变化。进一步采用 Hailwood-Horrobin(H-H)理论解析吸着等温线,并运用 Parallel Exponential Kinetics(PEK)模型表征吸湿动力学过程,对比分析不同部位吸湿−湿胀行为的差异与规律。**【结果】**毛竹在径向具有梯度结构,纤维体积分数从竹青侧(34.13 ± 0.84)% 到竹黄侧(15.87 ± 0.12)% 呈递减趋势。在本研究条件下的吸湿平衡态,平衡含水率(EMC)表现出竹青侧 < 竹中部 < 竹黄侧的梯度特征,而湿胀率均呈现竹青侧 > 竹中部 > 竹黄侧的相反趋势,当 RH > 57% 时,这种差异更为显著。在吸湿过程中,当 RH ⩽ 57% 时,竹黄侧在吸湿初期的吸湿速率显著高于竹青侧,相应地,湿胀响应也更快;而当 RH > 57% 时,不同位置在吸湿初期的吸湿速率趋于一致,竹青侧则始终表现出了最大的湿胀率。**【结论】**毛竹的吸湿−湿胀关系随着吸湿过程的进行而发生阶段性转变,此转变源于由竹黄侧至竹青侧递增的纤维体积分数,它决定了竹黄侧到竹青侧由“强吸湿、快湿胀响应”向“弱吸湿、高湿胀潜力”过渡的特性。本研究揭示了毛竹梯度结构对吸湿−湿胀耦合行为的主导机制,研究结果不仅有助于竹材尺寸稳定化改性的进一步探索,也可为新型功能梯度竹复合材料的结构优化设计提供有效策略。

关键词: 毛竹;水分−变形响应;径向梯度结构;纤维体积分数;平衡含水率(EMC);Hailwood-Horrobin(H-H)理论;Parallel Exponential Kinetics(PEK)模型;功能梯度材料;尺寸稳定性

中图分类号: S781.33;S781.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000−1522(2025)11−0167−08

引文格式: 万晨琪,周梦佳,马尔妮. 毛竹径向梯度结构对吸湿的影响Ⅱ:吸湿−湿胀行为[J]. 北京林业大学学报,2025,47(11):167−174. Wan Chenqi, Zhou Mengjia, Ma Erni. Influence of radial gradient structure on moisture absorption of *Phyllostachys edulis* Ⅱ: moisture absorption-swelling behavior[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 167−174.

Influence of radial gradient structure on moisture absorption of *Phyllostachys edulis* Ⅱ: moisture absorption-swelling behavior

Wan Chenqi Zhou Mengjia Ma Erni
(Beijing Key Laboratory of Wood Science and Engineering, School of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [**Objective**] The hygroscopicity of bamboo and the resulting swelling pose significant constraints on its high-value utilization. However, the mechanism underlying its moisture adsorption-swelling response remains unexplained. To address this, the moisture and dimensional responses of bamboo from the bamboo outer layer to the bamboo inner layer were investigated during adsorption process and at equilibrium state under various relative humidity (RH) conditions, aiming to reveal the influence of radial gradient structure in

收稿日期: 2025−06−06 **修回日期:** 2025−11−07

基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFD2200501)。

第一作者: 万晨琪。主要研究方向:木材物理学。Email:wanchenqi@bjfu.edu.cn 地址:100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料科学与技术学院。

责任作者: 马尔妮,教授。主要研究方向:木材物理、木材保护与改性。Email:maerni@bjfu.edu.cn 地址:同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn;http://journal.bjfu.edu.cn

culm wall on their adsorption-swelling behavior. [**Method**] The culm wall of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) was radially divided into three sections: bamboo outer layer, bamboo middle layer, and bamboo inner layer as the research objects, with fiber volume fraction serving as a quantitative indicator of its gradient structure. Under five RHs, i.e. 11%, 33%, 57%, 84% and 97%, the moisture content and dimensional changes of specimens from each section were recorded during adsorption process as well as at equilibrium state. The sorption isotherms were further analyzed using the Hailwood-Horrobin (H-H) theory, and the sorption kinetics were fitted with the Parallel Exponential Kinetics (PEK) model to compare the differences in the moisture adsorption-swelling behavior among different radial positions. [**Result**] Moso bamboo exhibited a distinct gradient structure along its radial direction, with the fiber volume fraction showing a decreasing trend from the bamboo outer layer ((34.13 ± 0.84)%) to the bamboo inner layer ((15.87 ± 0.12)%). Under the equilibrium state in this work, the equilibrium moisture content (EMC) demonstrated a monotonous characteristic of bamboo outer layer < bamboo middle layer < bamboo inner layer, whereas the swelling rate displayed an opposite tendency of bamboo outer layer > bamboo middle layer > bamboo inner layer. These differences became more pronounced when the RH exceeded 57%. During the moisture adsorption process, at RH ≤ 57%, the bamboo inner layer exhibited a significantly higher sorption rate during the initial stage compared with the bamboo outer layer, accompanied by a correspondingly faster swelling response. In contrast, at RH > 57%, the initial sorption rate across different radial positions tended to converge, while the bamboo outer layer consistently showed the highest swelling rate. [**Conclusion**] The adsorption-swelling relationship of moso bamboo underwent phase transition during adsorption process. This transition originated from the increasing fiber volume fraction from the bamboo inner layer to the bamboo outer layer, which determined the characteristic transition from "strong adsorption and rapid swelling response" to "weak adsorption and high swelling potential" across this gradient structure. This study revealed the dominant mechanism of moso bamboo's gradient structure in governing its adsorption-swelling coupling behavior. The findings could not only contribute to further exploration in the stabilizing modification for bamboo but also provide effective strategies for the structural optimization of novel functionally graded bamboo composites.

Key words: moso bamboo (*Phyllostachys edulis*); moisture deformation response; radial gradient structure; fiber volume fraction; equilibrium moisture content (EMC); Hailwood-Horrobin (H-H) theory; Parallel Exponential Kinetics (PEK) model; functionally gradient material; dimensional stability

竹子是一种可快速再生的生物质资源，在我国分布广泛[1]，它力学性能优异，减碳固碳能力强且具备环境友好特征[2]，近年来在生物基建材及代塑材料领域展现出巨大的应用潜力。作为吸湿性材料，竹材能够通过自发的吸湿和解吸行为维持周围环境湿度的动态平衡，这种湿缓冲效应使得竹制家居空间具备更加舒适的使用体验[3]。然而，吸湿–解吸循环伴随的宏观变形（翘曲、开裂）严重制约了竹材的高值化利用[4]。

与木材的解剖构造相比，竹材在径向上具有独特的功能梯度复合结构[5]——从竹青侧（竹壁外侧）到竹黄侧（竹壁内侧），纤维体积分数逐渐降低，而薄壁组织体积分数则相应递增，纤维与薄壁组织形成"刚–柔"复合体系[6]。因此，木、竹材吸湿性及尺寸响应行为存在较大差异。对木材而言，吸湿和湿胀呈现出正相关关系[7]。对竹材而言，一方面，由于纤维的吸湿性弱于薄壁组织，故竹材的吸湿性由外侧至内侧呈现出递增趋势[8]；另一方面，纤维的绝对膨胀高于薄壁组织，对竹材的宏观湿胀起主导作用[9]。在径向梯度结构作用下，纤维"高湿胀性"与薄壁组织"高吸湿性"使得在外界湿度发生变化时，竹材的尺寸变化行为较木材更为复杂[10]，其吸湿–湿胀响应机制尚不明确。因此，阐明竹材吸湿–湿胀沿竹壁径向的变异规律，不仅可为精准调控竹材变形、提升制品尺寸稳定性提供依据，也能为仿生功能梯度竹基材料的设计与优化奠定理论基础。

近年来，竹材的吸湿性规律逐渐被解明，动态水蒸气吸着（DVS）技术的引入使竹材多尺度吸湿研究取得突破。在宏观尺度，随着相对湿度（relative humidity，RH）的增加，纤维体积分数与含水率呈现负相关[10]；吸湿过程中竹材试样含水率变化率随时间呈先快速上升、后逐渐下降直至稳定的趋势，且较高 RH 下竹材达到吸湿平衡所需时间更长[11]。在细胞尺度，薄壁细胞较纤维细胞具有更强的吸湿能力，相

同湿度下其平衡含水率（equilibrium moisture content，EMC）大于纤维细胞[12]。对吸湿过程而言，相比于纤维细胞，薄壁细胞对水分响应更加敏感，更易达到吸湿平衡[13]。另一方面，以往研究多聚焦于竹材尺寸变形的各向异性[14−15]，对基于径向梯度结构的“吸湿−变形”耦合机制关注不足。而且现有尺寸变形测试普遍采用泡水法瞬间吸水，忽略了吸湿范围内的连续响应，无法揭示位置相关的湿胀演化路径。

为了厘清从绝干到纤维饱和点区间内竹材不同位置的尺寸变化规律，本研究沿毛竹竹青侧−竹中部−竹黄侧获得纤维体积分数梯度变化的试样，测定其吸湿平衡态和吸湿过程中含水率与湿胀大小，构建“部位−RH−含水率−变形”之间的联系。本研究旨在系统阐明梯度结构对吸湿−湿胀耦合行为的主导机制，进而丰富对毛竹吸湿−湿胀关系的理解，并为开发“外层高强−内层高缓冲”的新型功能梯度竹复合材料奠定理论依据。

1　材料与方法

1.1　材　料

本研究以江西省宜春市的 3～4 年生毛竹（*Phyllostachys edulis*）为原料，截取竹秆基部 2～3 m 高度处的竹材。经自然风干处理后，去除竹青与竹黄，加工制成规格为 1 000 mm（纵向，*L*）× 20 mm（横向，*T*）× 7 mm（径向，*R*）的竹条试件。随后将竹条进一步切割为 20 mm（*L*）× 20 mm（*T*）× 7 mm（*R*）的竹块试件，筛除含有竹节的试件。实验试剂为分析纯的氯化锂（LiCl）、氯化镁（$MgCl_2$）、溴化钠（NaBr）和氯化钾（KCl），购自上海麦克林生化科技有限公司。

1.2　研究方法

1.2.1　径向梯度结构的量化

为探究梯度结构对吸湿−湿胀行为的影响，研究采用了光学显微成像技术联合数字图像处理技术测定竹材纤维体积分数，以此量化竹壁径向的梯度结构。首先将预制竹块试件置于 60 ℃ 恒温水浴环境中软化处理 72 h，随后采用 ZD-2205 型旋转式切片机制备厚度为 15 μm 的毛竹横截面切片，使用 Leica Biological 系列光学显微镜对切片进行显微成像，获取可供定量分析的高分辨率图像。随后将图像导入 FIJI 软件，经单位换算后，利用 Find edges 功能自动识别各组织轮廓以便精准圈定各组织边界。计算纤维鞘区域的面积总和与图幅总面积的比值即纤维体积分数。

在纤维体积分数的计算中，假定竹材所有细胞呈纵向平行排列，则相对横截面积可以代表体积分数[16]。

$$F_{\mathrm{v}} = \frac{\sum S_{\mathrm{F}}}{S_{\mathrm{Total}}} \times 100\% \tag{1}$$

式中：F_{v} 为纤维体积分数，S_{F} 为图幅内纤维鞘区域的总面积（μm²），S_{Total} 为图幅面积（μm²）。

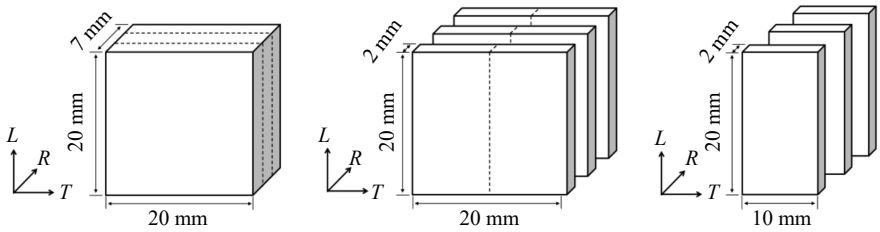
1.2.2　吸湿−湿胀的测定

1.2.2.1　不同位置试样的制作

本研究基于竹材径向梯度结构特征，采用 STX-202A 型数控金刚石线切割系统对 1.1 中预制竹块试件进一步制材。在精密伺服控制驱动下，直径为 0.25 mm 的金刚石切割线以 0.8 mm/min 恒速进给，首次切割将 1.1 中试件（图 1a）加工为 20 mm（*L*）× 20 mm（*T*）× 2 mm（*R*）的基准试样（图 1b）。随后进行二次切割将试样的尺寸优化为 20 mm（*L*）× 10 mm（*T*）× 2 mm（*R*）（图 1c），以减小后续绝干及调湿过程中试样发生翘曲带来的尺寸测量误差。将分离后的试样按解剖学特征划分为竹青侧、竹中部及竹黄侧 3 个部分，每部分制备 15 个重复样本，累计获得 45 个试样。

1.2.2.2　含水率及尺寸测量

将上述 45 个试样分为 5 组，每组包含竹青侧、竹中部、竹黄侧各 3 个重复样本。利用鼓风干燥箱在 103 ℃ 下将试样干燥至质量恒定后，记录绝干质量 m_0 和径向尺寸 R_0、弦向尺寸 T_0。随后将 5 组试样分别置于装有 LiCl、$MgCl_2$、NaBr、KCl 这 4 种饱和盐溶液和去离子水的玻璃干燥皿中，其分别对应 11%、33%、57%、84% 和 97%RH。在（25.0 ± 0.5）℃ 的恒温条件下，于 3、6、15、24、60 和 180 h 的预设时间节点获取各试样的瞬时质量 m_t、径向尺寸 R_t 及



a 预制竹块试件　　b 一次切割试样　　c 二次切割试样

图 1　线切机切割示意图

Fig. 1　Schematic diagram of wire cutting machine cutting

弦向尺寸 T_t。当连续 24 h 质量变化率≤0.02% 时，判定达到吸湿平衡。质量测量采用精度为 0.000 1 g 的电子分析天平，尺寸测定采用精度为 0.001 mm 的电子测厚仪。

通过式(2)计算各试样含水率。

$$\mathrm{MC}=\frac{m_t-m_0}{m_0}\times 100\% \tag{2}$$

式中：MC 为试样的含水率，m_t-m_0 为 t 时刻样品吸着的水分质量(g)。

通过式(3)和(4)计算试样径向湿胀率(R_{sr})与弦向湿胀率(T_{sr})。

$$R_{sr}=\frac{R_t-R_0}{R_0}\times 100\% \tag{3}$$

$$T_{sr}=\frac{T_t-T_0}{T_0}\times 100\% \tag{4}$$

式中：R_t-R_0 与 T_t-T_0 分别为 t 时刻样品在径向湿胀量与弦向湿胀量(mm)，R_0 与 T_0 分别是绝干样品的径向尺寸与弦向尺寸(mm)。

1.2.2.3 吸湿平衡态与吸着动力学分析

采用 Hailwood-Horrobin(H-H)水分吸着理论[17]分析竹青侧、竹中部和竹黄侧样品的吸着等温线，进一步探究不同 RH 下各位置试样的水合水和溶解水含量。

$$\mathrm{EMC}=m_h+m_s=\frac{18}{W}\cdot\frac{K_1K_2H_R}{1+K_1K_2H_R}+\frac{18}{W}\cdot\frac{K_2H_R}{1-K_2H_R} \tag{5}$$

式中：EMC 为试样的平衡含水率(%)，m_h 为水合水含水率(%)，m_s 为溶解水含水率(%)，W 为每摩尔吸着位点的绝干竹材质量(g/mol)，18/W 表示木材中有效吸着基团被水合水饱和时的含水率，K_1 为溶解水与水合水之间的平衡常数，K_2 为溶解水与环境温湿度之间的平衡常数。W、K_1 和 K_2 均通过将吸湿平衡态数据导入 Origin 9.0 软件拟合计算获得。H_R 为相对湿度。

此外，采用 Parallel Exponential Kinetics(PEK)模型[18]分析竹青侧、竹中部和竹黄侧试样的吸着动力学曲线。

$$\mathrm{MC}=C_{M0}+C_{M1}\left(1-e^{-\frac{t}{t_1}}\right)+C_{M2}\left(1-e^{-\frac{t}{t_2}}\right) \tag{6}$$

式中：C_{M0} 是试样吸湿前的初始含水率(%)，本研究的绝干试样初始含水率取 0；两个指数项分别表示快速吸湿阶段和慢速吸湿阶段，C_{M1} 和 C_{M2} 分别对应两种吸湿速度下试样的含水率(%)，t_1 和 t_2 是两种吸湿速度下试样的特征时间。C_{M1}、C_{M2}、t_1 和 t_2 均通过将吸着动力学数据导入 Origin 9.0 软件计算得到。

2 结果与讨论

2.1 毛竹的径向梯度结构

在组织水平上，可以清晰地观察到整个竹肉区域的“两相”复合结构(图 2)：维管束以一定规律嵌入均匀的薄壁细胞基质中[19]。从竹青侧至竹黄侧，维管束的分布密度逐渐减小，由于竹材维管束的实质部分主要为纤维鞘，这意味着纤维鞘的体积分数从竹青侧向竹黄侧呈递减趋势。

为定量表征毛竹竹壁径向的梯度结构，本研究计算了各组织在径向不同位置的占比(图 3)。其中，纤维体积分数(图 3a)表现为竹青侧(34.13 ± 0.84)% > 竹中部(21.09 ± 0.54)% > 竹黄侧(15.87 ± 0.12)%，而薄壁组织体积分数(图 3b)则表现为竹青侧(61.67 ± 0.88)% < 竹中部(74.57 ± 0.31)% < 竹黄侧(80.75 ± 0.23)%。这种梯度变化趋势及相应的数值大小与以往文献[16]报道的结果相符。

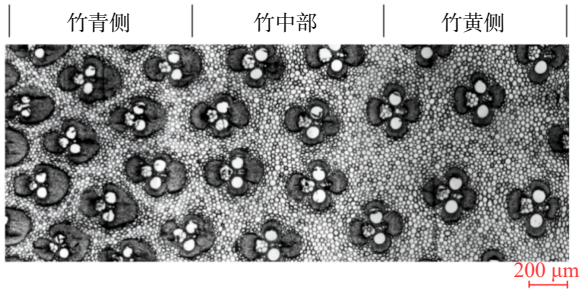


图 2 维管束沿竹壁径向的梯度分布

Fig. 2 Gradient distribution of vascular bundles along radial direction of bamboo wall

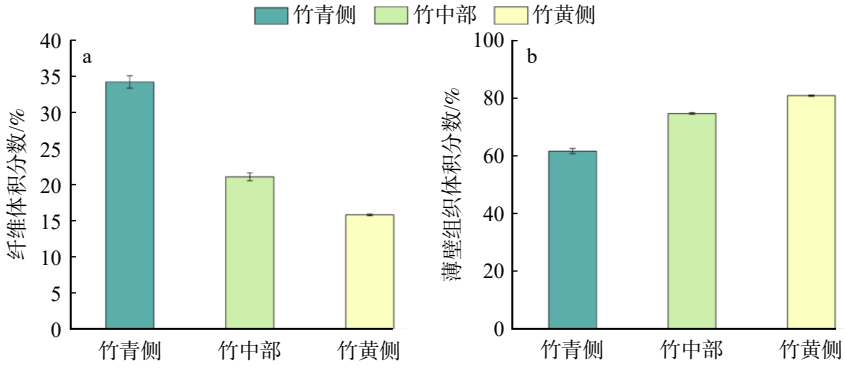


图 3 纤维和薄壁组织在径向不同位置的体积分数

Fig. 3 Volume fraction of fiber and parenchyma at different locations along radial direction

2.2　毛竹的吸湿行为

2.2.1　竹壁径向不同位置试样的吸着等温线

毛竹的 EMC 随着 RH 的增大而增大，其变化趋势具有典型的“S”形特征，符合 II 型吸着等温线[20]的规律。在 57% RH 及以下的中低湿度域，竹青侧、竹中部和竹黄侧的吸着等温线呈“上凸”的趋势，但增势较缓，不同位置试样之间的 EMC 未呈现出显著差异。在 57% RH 以上的中高湿度域，吸着等温线呈现“下凹”的形态，EMC 随 RH 的升高显著增加，其数值大小呈现竹青侧 < 竹中部 < 竹黄侧的递变规律，且随着 RH 升高，各位置试样之间的 EMC 差异明显升高。当 RH 为 97% 时，竹青侧、竹中部、竹黄侧的 EMC 分别为 28.98%、32.31%、39.03%(图 4)。这种吸湿性的梯度变化与 2.1 中薄壁组织体积分数的梯度变化趋势成正相关。这个结果意味着薄壁组织占比更高的竹黄侧吸湿性更强，这主要源于薄壁细胞细胞壁孔隙较纤维细胞更发达[21]，对水分提供更多容纳空间[22]。

当 RH 为 57% 时，毛竹由竹青侧至竹黄侧的水合水含量(竹青侧 3.85%、竹中部 3.86%、竹黄侧 3.89%)(图 5a)与溶解水含量(竹青侧 3.95%、竹中部 4.14%、竹黄侧 4.29%)(图 5b)基本相当。随着 RH 升高，水合水含量增长有限，而溶解水含量则显著增加。这表明细胞壁水在低于 57%RH 时主要以水合水形式存在，而在高于 57%RH 时转变为以溶解水为主导。

进一步对不同位置试样的水合水含量进行分析，发现水合水饱和含水率呈现竹青侧(4.03%) < 竹中部(4.12%) < 竹黄侧(4.29%)的趋势，这表明竹黄侧可能具有更多的可及吸着位点。水合水饱和含水率大小与前人研究[11]中报道的约 4.00% 的水平大致相当。溶解水含量同样呈现出竹青侧 < 竹中部 < 竹黄侧的规律。这是由于相较于纤维细胞，薄壁细胞的壁层结构更为疏松，其细胞壁内部具有更丰富的细胞壁孔隙[8]，这使其具有更丰富的物理容纳空间，有利于溶解水的形成，而竹黄侧的薄壁组织占比最高(图 3b)，因此竹黄侧具有更大的溶解水含量。

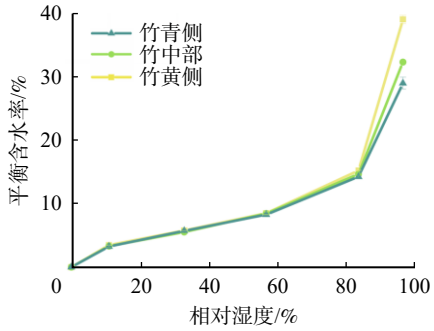


图 4　不同相对湿度下竹青侧、竹中部和竹黄侧的平衡含水率

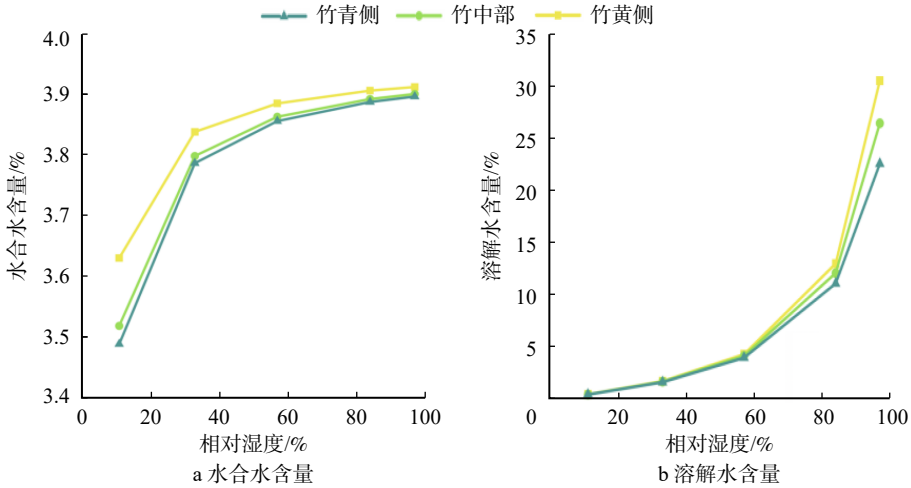
Fig. 4　Equilibrium moisture content of samples from bamboo outer layer to bamboo inner layer at different relative humidities

表 1 显示竹青侧、竹中部、竹黄侧吸湿数据的拟合优度 R^2 均大于 0.970，这表明拟合效果较好。W 值的分布范围为 419.58 ~ 446.65，与以往研究的结果(384.87 ~ 444.88)[11]、(432.27 ~ 527.81)[23]相当；此外，参数 K_1 与 K_2 的数值从竹青侧至竹黄侧的递增趋势与 Yuan 等[13]报道的变化规律一致，其分布规律表明，水分子与细胞壁物质的相互作用在竹黄侧更为活跃。

2.2.2　竹壁径向不同位置的吸着动力学

除 84%RH 下竹青侧组的 R^2 为 0.977 外，其余组 R^2 均大于 0.995，表明 PEK 模型能够较为准确地描述毛竹在不同 RH 下含水率的动态变化过程。在吸湿初期，各位置试样的吸湿速率较大，随着吸湿过程的进行，吸湿速率逐渐减小直至达到平衡，整个吸湿过程呈现明显的两个阶段，即快速吸湿阶段和慢速吸湿阶段。

由图 6 可知，环境的 RH 越高，试样达到平衡所需要的时间越长。进一步对不同位置试样达到平衡



a 水合水含量　　b 溶解水含量

图 5　竹青侧、竹中部和竹黄侧试样的吸着水含量

Fig. 5　Adsorbed water contents of samples from bamboo outer layer to bamboo inner layer

表 1 竹青侧、竹中部和竹黄侧试样的 Hailwood-Horrobin 模型拟合参数

Tab. 1 Fitting parameters of Hailwood-Horrobin model for samples from bamboo outer layer to bamboo inner layer

位置	A	B	C	$18/W$	K_1	K_2	R^2
竹青侧	0.359 6	0.241 9	0.002 15	0.040 3	77.70	0.008 8	0.973 1
竹中部	0.339 8	0.236 7	0.002 24	0.041 2	81.96	0.009 0	0.974 5
竹黄侧	0.243 2	0.228 6	0.002 29	0.042 9	95.87	0.009 9	0.974 1

注：A、B和C为常数，W为每摩尔吸着位点的绝干竹材质量(g/mol)，K_1为溶解水与水合水之间的平衡常数，K_2为溶解水与环境温湿度之间的平衡常数。

所需要的时间进行分析，如图 6a ~ c 所示，在 RH≤57% 条件下，竹黄侧因更丰富的孔隙而呈现更迅速的水分响应，其吸湿速率在快速吸湿阶段超越竹中部与竹青侧，使其达到吸湿平衡态所需时间最短。当 RH > 57% 时(图 6d、e)，竹黄侧达到平衡态的时间反而最长，此现象可能归因于其更高的平衡含水率需更长的水分吸着过程[11]。此外，竹黄侧在快速吸湿阶段的水分响应更强的特征随 RH 的升高而减弱，以至于在 84%RH(图 6d)与 97%RH(图 6e)的高湿度域中，不同径向位置试样的初始吸湿速率几乎没有差异。

2.3 毛竹的湿胀行为

2.3.1 吸湿平衡态下的尺寸响应

不同位置试样的径、弦向湿胀率随 RH 提升均呈现递增趋势。值得注意的是，当 RH 低于 57% 时，径、弦湿胀率的增幅较小；而 RH 超过 57% 后，径、弦湿胀率明显增大。这表明溶解水对竹材的湿胀起主要作用。

对于径向上不同位置试样的湿胀率，无论在径向还是弦向，当 RH 超过 57%，薄壁组织占比高达 80%(图 3)，溶解水含量高的竹黄侧(图 5b)并没有展现出最大的湿胀率，其径、弦向湿胀率反而显著低于竹青侧，即在中高湿度域，相同 RH 下的径、弦向湿胀率呈现为竹青侧 > 竹中部 > 竹黄侧的递变规律，这归因于竹青侧更高的细胞壁密度。因此，竹材的湿胀率与其细胞壁密度呈正比，使得纤维体积分数最大的竹青侧呈现出最大的湿胀率。

此外，竹材的湿胀展现出明显的各向异性，对比图 7a 和 7b 可以发现，竹材的径向湿胀率显著高于弦向湿胀率。以 97%RH 为例，竹青侧的最大径向湿胀率为 7.06%，而最大弦向湿胀率仅为 5.56%，径/弦向湿胀比约为 1.27，这与文献 [14] 结果中的数值相当。另一方面，径/弦向湿胀比的数值范围在不同位置试样之间存在差异，表现为竹青侧(1.27 ~ 5.19) > 竹中部(1.09 ~ 2.75) > 竹黄侧(1.12 ~ 2.05)。

2.3.2 吸湿过程中的尺寸响应

图 8a ~ e 以径向湿胀率为例，展示了不同 RH 下吸湿过程中毛竹尺寸的经时变化，发现毛竹的径向湿胀率随着吸湿过程的进行呈现增长趋势，且在吸湿初期显著增长，随着吸湿的进行，其湿胀速率逐渐

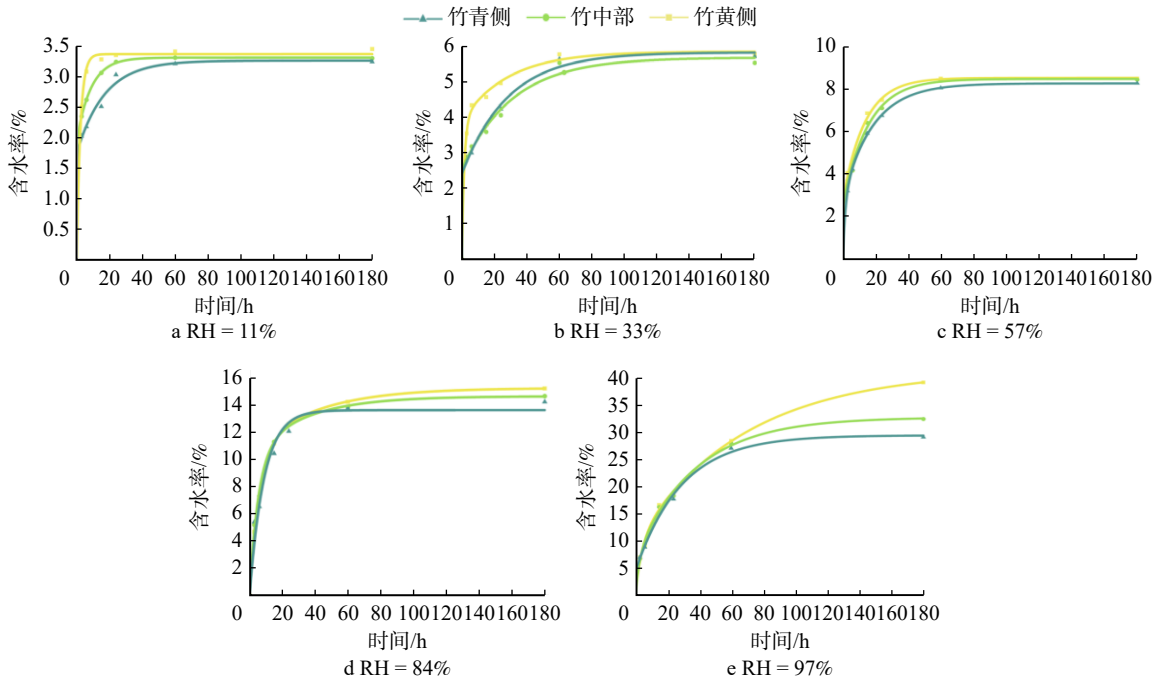
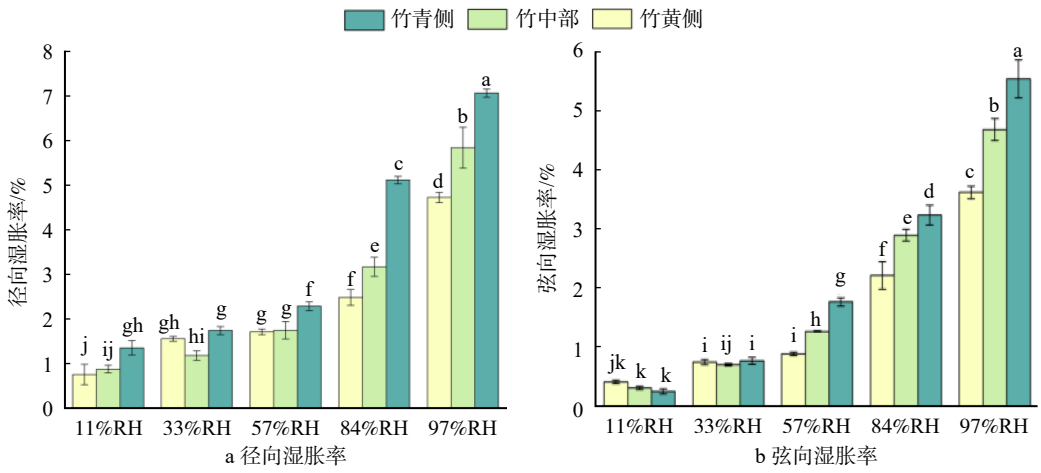


图 6 不同相对湿度下竹青侧、竹中部和竹黄侧试样的吸着动力学曲线

Fig. 6 Sorption kinetics curves of samples from bamboo outer layer to bamboo inner layer at different relative humidities



不同相对湿度之间或不同部位之间，字母相同表明在 0.05 水平下差异不显著，字母不同表明在 0.05 水平下差异显著。下同。

图 7　竹青侧至竹黄侧试样在不同相对湿度下的湿胀率

Fig. 7　Swelling rates of samples from bamboo outer layer to bamboo inner layer at different relative humidities

减小，这与 2.2.2 吸着动力学中含水率变化趋势一致。

如图 8a ~ c 所示，对于 57% RH 及以下的中低湿度域，在吸湿初期不同位置试样的径向湿胀率呈现出竹黄侧 > 竹中部 > 竹青侧的梯度趋势；然而，随着吸湿的继续进行，竹青侧逐渐表现出最大的湿胀率。竹材径向尺寸响应的快慢与纤维体积分数呈负相关，纤维体积分数越大，尺寸响应越慢。这可能是由于在中低湿度域，竹黄侧具有更丰富的孔隙结构，有利于水分的快速扩散。这意味着薄壁细胞对环境湿度更加敏感，竹黄侧尺寸变形能够对含水率变化迅速作出响应。而水分子进入密实的纤维细胞细胞壁内部则需要更长的时间。另一方面，从图 8a ~ c 与图 8d ~ e 可以发现，在高 RH 条件下，即使在吸湿初期，竹青侧也表现出了最大的径向湿胀率。这是由于 RH > 57%，竹青侧至竹黄侧试样在吸湿初期的吸湿速率并没有显著差异（图 6d ~ e）。因此，当水分子不断进入实质含量高的纤维细胞细胞壁后，竹青侧表现出最大的湿胀率。

3　结　　论

本研究以毛竹为对象，考察了不同相对湿度（RH）条件下竹青侧至竹黄侧在吸湿平衡态和吸湿过程中的水分与变形响应行为，揭示了竹壁径向梯度结构对吸湿–湿胀行为的影响，提出了纤维体积分

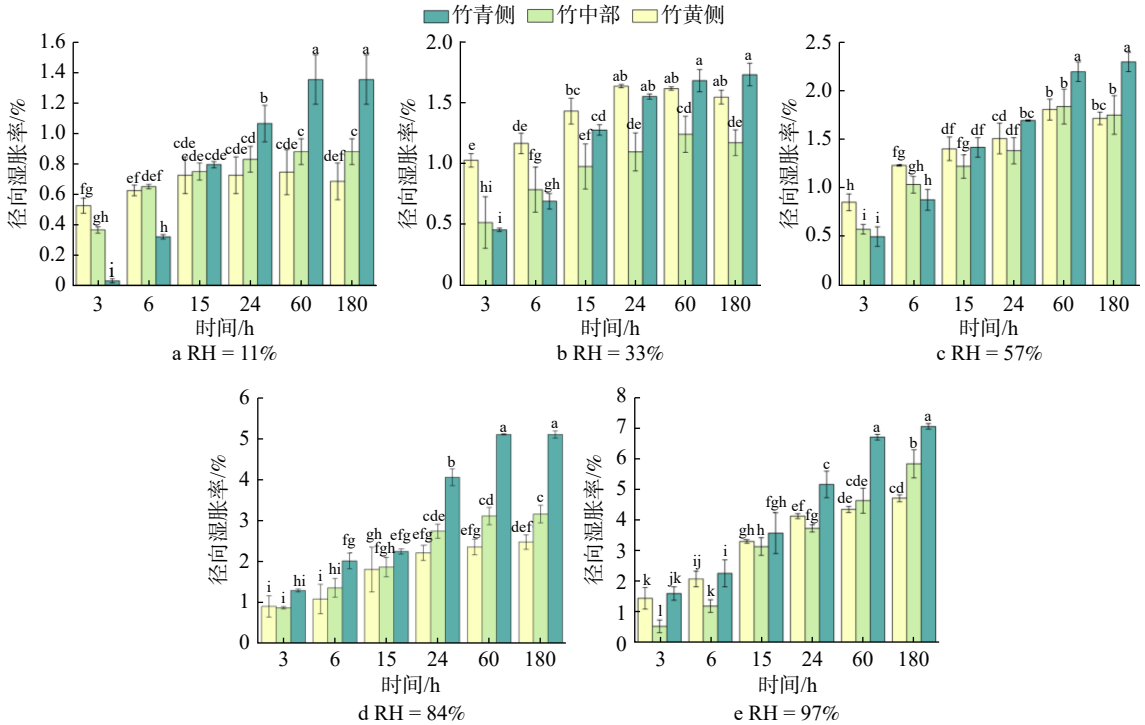


图 8　不同相对湿度下竹青侧至竹黄侧试样的径向经时湿胀响应

Fig. 8　Radial time-dependent swelling response of samples from bamboo outer layer to bamboo inner layer at different relative humidities

数增加是竹黄侧至竹青侧吸湿–湿胀关系由“强吸湿、快湿胀响应”向“弱吸湿、高湿胀潜力”转变的关键原因。具体结论如下。

(1)在吸湿平衡态，以 57%RH 为关键转折点，RH 高于该值时径向湿胀率与弦向湿胀率明显增加，即溶解水对毛竹的湿胀起主导作用。就不同部位而言，吸湿性更强的竹黄侧没有展现出最大的湿胀率，即细胞壁密度对毛竹的湿胀起决定作用。

(2)吸湿过程中，在 RH≤57% 时，竹黄侧因薄壁组织含量高、吸湿性强而相应地快速湿胀，在吸湿初期，竹壁径向不同部位试样之间均呈现吸湿–湿胀正相关关系；随着吸湿的进行，高纤维含量的竹青侧湿胀迅速增大，吸湿–湿胀在径向不同部位试样之间转变为负相关关系。此外，在 RH > 57% 时，由于外界湿度增大，竹黄侧在吸湿初期的快湿胀响应被削弱，竹青侧几乎始终表现出了最大的湿胀率。

基于毛竹的径向梯度结构，可遵循结构仿生原理，将高纤维含量的竹青侧与吸湿响应快的竹黄侧分别作为高强度外层与高缓冲内层的功能单元，以实现材料性能的优化匹配。未来的研究将进一步聚焦于在细胞尺度下探究纤维细胞与薄壁细胞的协同变形作用，以期在微观水平上为毛竹的吸湿–湿胀行为提供见解，并尝试构建跨尺度关联。

参 考 文 献

[1] 王雪苑, 黄宇翔, 马尔妮. 基于纤维素骨架的毛竹热处理材力学性能研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(7): 130−138.
Wang X Y, Huang Y X, Ma E N. Research on mechanical properties of *Phyllostachys edulis* heat treatment materials based on cellulose skeleton[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(7): 130−138.

[2] Wang X K, Zhang S Q, Chen L, et al. Effects of pith ring on the hygroscopicity and dimensional stability of bamboo[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 184: 115027.

[3] Zhang Y M, Huang X A. Effects of internal structure and chemical compositions on the hygroscopic property of bamboo fiber reinforced composites[J]. Applied Surface Science, 2019, 492: 936−943.

[4] Pang S J, Jeong G Y. Swelling and shrinkage behaviors of cross-laminated timber made of different species with various lamina thickness and combinations[J], Construction and Building Materials, 2020, 240: 117924.

[5] 王福利, 王献轲, 周佳硕, 等. 竹材薄壁组织拉伸性能及其变异规律的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 130−137.
Wang F L, Wang X K, Zhou J S, et al. Tensile properties and its variation pattern of bamboo parenchyma[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(11): 130−137.

[6] Yuan J, Fang C H, Chen Q, et al. Observing bamboo dimensional change caused by humidity[J]. Construction and Building Materials, 2021, 309: 124988.

[7] 母军. 林木生物质材料基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2023.
Mu J. Fundamentals of forest biomass materials[M]. Beijing: Science Press, 2023.

[8] Yuan J, Chen Q, Fei B H. Different characteristics in the hygroscopicity of the graded hierarchical bamboo structure[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 176: 114333.

[9] Chen Q, Fang C H, Wang G, et al. Hygroscopic swelling of moso bamboo cells[J]. Cellulose, 2020, 27: 611−620.

[10] Zhan T F, Sun C, Lv Q, et al. Evaluation of moisture diffusion in lignocellulosic biomass in steady and unsteady states by a dynamic vapor sorption apparatus[J]. Holzforschung, 2019, 73(12): 1113−1119.

[11] 袁晶. 不同空间尺度毛竹吸湿机制研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2022.
Yuan J. Study on hygroscopic mechanism of moso bamboo at different spatial scales[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2022.

[12] Yuan J, Lei Y F, Mi B B, et al. Differences in the hygroscopic behavior of bamboo fiber and parenchyma[J]. Wood Science and Technology, 2024, 58: 575−587.

[13] Yuan J, Chen L, Chen Q, et al. Inherent characteristics of the hygroscopicity of fiber and parenchyma of bamboo[J]. Cellulose, 2022, 29: 4951−4959.

[14] Roszyk E, Kropaczewski R, Mania P, et al. Swelling behaviour of bamboo (*Phyllostachys pubescens*)[J]. Forests, 2024, 15(1): 118.

[15] Mou Q, Hao X, Xu K, et al. Hygroexpansion behaviors of bamboo in response to moisture absorption and desorption[J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127895.

[16] Zhan T Y, Sun F Z, Chao L, et al. Moisture diffusion properties of graded hierarchical structure of bamboo: longitudinal and radial variations[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259: 119641.

[17] Chauhan S S, Aggarwal P, Karmarkar A, et al. Moisture adsorption behaviour of esterified rubber wood (*Hevea brasiliensis*)[J]. Holz als Roh- und Werkstoff, 2001, 59(4): 250−253.

[18] Kohler R, Dück R, Ausperger B, et al. A numeric model for the kinetics of water vapour sorption on cellulosic reinforcement fibers[J]. Composite Interfaces, 2003, 10(2−3): 255−276.

[19] Kalali E N, Hu Y, Wang X, et al. Highly-aligned cellulose fibers reinforced epoxy composites derived from bulk natural bamboo[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 129: 434−439.

[20] Brunauer S, Emmett P, Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers[J]. Journal of the American Chemical Society, 1938, 60: 309−319.

[21] 彭珊珊. 两种木材动态吸附及孔隙特征研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
Peng S S. Study on dynamic water vapour sorption properties and pore characteristics of two species of wood[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019.

[22] Yang X, Pang X N, Liu X G, et al. Determining the pore structure and radial variability of Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*)[J]. Wood Science and Technology, 2023, 57: 345−357.

[23] Chen Q, Wang G, Ma X X, et al. The effect of graded fibrous structure of bamboo (*Phyllostachys edulis*) on its water vapor sorption isotherms[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 151: 112467.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 曹金珍）